

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. *Quenching*

Quenching merupakan salah satu proses Heat treatment dimana baja di panaskan pada suhu di atas daerah kritis dan dicelupkan pada media pendingin untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan terhadap aus. (Purwanto, 2011). Dimana prosesnya dilakukan dengan pendinginan yang relatif cepat dari temperatur austenisasi (umumnya pada jarak temperatur 815°C - 870°C) pada baja. Keberhasilan proses *quenching* ditentukan oleh media *quenching* (*quenchant medium*) yang digunakan. Untuk menentukan media *quenching*, sangat bergantung pada mampu keras (*hardenability*) dari logam, ketebalan dan bentuk dari benda uji yang akan *quenching*. Serta struktur mikro yang diinginkan dari hasil proses *quenching*. Adapun media *quenching* yang sering digunakan adalah media cair (*liquid*) dan gas. Media *quenching* cair adalah oli, air, larutan polimer (*aquos polymer solution*), Larutan garam. Sedangkan media *quenching* gas adalah helium, argon, dan nitrogen. Penelitian ini akan menggunakan media pendinginan langsung yaitu air dan oli. (Finahari & Sahbana, 2019)

Proses *quenching* melibatkan beberapa faktor yang saling berhubungan. Pertama yaitu jenis media pendingin dan kondisi proses yang digunakan, yang kedua adalah komposisi kimia dan *hardenability* dari logam. *Hardenability* merupakan fungsi dari komposisi kimia dan ukuran butir pada temperatur tertentu. Selain itu, dimensi dari logam juga berpengaruh terhadap hasil proses *quenching*. (NUGROHO & HARYADI, 2005)

2.1.1. Media Pendinginan *Quenching*

Tujuan utama dari proses pengerasan adalah agar diperoleh struktur martensit yang keras, sekurang-kurangnya di permukaan baja. Hal ini hanya dapat dicapai jika menggunakan medium *quenching* yang efektif sehingga baja didinginkan pada suatu laju yang dapat mencegah terbentuknya struktur yang lebih lunak seperti perlit atau bainit. Tetapi berhubung sebagian besar benda kerja sudah berada dalam tahap akhir dari proses, maka kualitas medium *quenching* yang digunakan harus dapat menjamin agar tidak timbul distorsi pada benda kerja setelah proses quench selesai dilaksanakan. Hal tersebut dapat dicapai dengan cara menggunakan media *quenching* yang sesuai tergantung pada jenis baja yang diproses, tebal penampang dan besarnya distorsi yang diijinkan. Untuk baja karbon, medium *quenching* yang digunakan adalah air, sedangkan untuk baja paduan medium yang disarankan adalah oli. (H.Anrinal 2013). Namun juga ada bermacam macam media yang digunakan untuk mendinginkan baja, berbagai bahan pendinginan yang digunakan dalam proses perlakuan *quenching* antara lain:

a. Air

Air adalah media yang paling banyak digunakan untuk *quenching*, karena biayanya yang murah, dan mudah digunakan serta pendinginannya yang cepat. Air khususnya digunakan pada baja karbon rendah yang memerlukan penurunan temperatur dengan cepat dengan tujuan untuk memperoleh kekerasan dan kekuatan yang baik. Air memberikan pendinginan yang sangat cepat, yang menyebabkan tegangan dalam, distorsi, dan retakan (Gary 2011).

b. Garam

Air garam adalah media yang sering digunakan pada proses *quenching* terutama untuk alat-alat yang terbuat dari baja. Beberapa keuntungan menggunakan air garam sebagai media adalah. Suhunya merata pada air garam, proses pendinginan merata pada semua bagian logam, tidak ada bahaya oksidasi, karburisasi, atau dekarburisasi selama proses pendinginan. (Gary 2011)

c. Minyak atau Oli

Minyak yang digunakan sebagai fluida pendingin dalam perlakuan panas benda kerja yang diolah terlebih dahulu. Selain minyak yang khusus digunakan sebagai bahan pendingin pada proses perlakuan panas, dapat juga digunakan oli, minyak bakar atau solar. Derajat kekentalan (*viscosity*) berpengaruh pada Severity Of Quench. Minyak mineral banyak dipilih karena kapasitas pendinginannya cukup baik. Pada umumnya minyak memiliki kapasitas pendinginan tertinggi sekitar temperatur 600°C, dan agak rendah pada temperatur pembentukan martensit. Laju pendinginan minyak bisa dinaikkan dengan tiga cara yaitu dengan agitasi, memanaskan minyak pada temperatur diatas temperatur kamar dan mengemulsikan air (*water soluble*). Jenis minyak mineral yang sering dipakai untuk aplikasi *quenching* pada industry yaitu oli khusus, oil quench. (Handoyo, 2015)

d. Udara

Pendinginan udara dilakukan untuk perlakuan panas yang membutuhkan pendinginan lambat. Untuk keperluan tersebut udara yang disirkulasikan ke dalam ruangan pendingin dibuat dengan kecepatan yang rendah. Udara

sebagai pendingin akan memberikan kesempatan kepada logam untuk membentuk Kristal-kristal dan kemungkinan mengikat unsur-unsur lain dari udara. Adapun pendinginan pada udara terbuka akan memberikan oksidasi oksigen terhadap proses pendinginan. (Handoyo, 2015)

2.1.2. Pemilihan Oli Sebagai Media *Quenching*

Oli/minyak mempunyai kelebihan diantaranya dapat digunakan pada berbagai temperatur secara efektif. Secara umum, oli/ minyak mempunyai laju pendinginan yang lebih lambat dibandingkan dengan air atau air garam. Oleh karena itu, media pendingin ini dapat memberikan hasil quenching dengan distorsi dan retak yang lebih kecil. Oli mempunyai titik nyala yang beragam antara 130° - 290° C. Dalam aplikasinya temperatur bak pendingin biasanya antara 75° - 110° C di bawah titik nyalanya untuk menghindari kemungkinan oli terbakar. (Harnowo, 2000).

Quench ke dalam oli pada saat ini paling banyak digunakan, manfaat dari pendinginannya oli adalah bahwa laju pendinginannya pada tahap pembentukan lapisan uap dapat dikontrol sehingga dihasilkan karakteristik quenching yang homogen. Laju pendinginan untuk baja yang diquench di oli relatif rendah karena tingginya titik didih dari oli. Memanaskan oli sampai sekitar $40 - 100^{\circ}$ C sebelum proses quenching akan meningkatkan laju pendinginan. (H.Anrinal 2013).

2.1.3. Kajian Penelitian Quenching Oli Sebelumnya

Menurut penelitian sebelumnya menggunakan material baja 1045, dengan variasi media quenching yang berbeda yaitu Air, Oli SAE 40 dan Oli SAE 50. Dari hasil pengujian didapat kekuatan terhadap beban tarik yang paling tinggi

diperoleh pada perlakuan quench menggunakan media pendingin oli SAE 40 sebesar 189 kN. Rendahnya kekuatan terhadap beban tarik dengan perlakuan celup cepat menggunakan media air kemungkinan karena adanya retak yang diakibatkan laju pendinginan yang cepat.(Rizal, 2014).

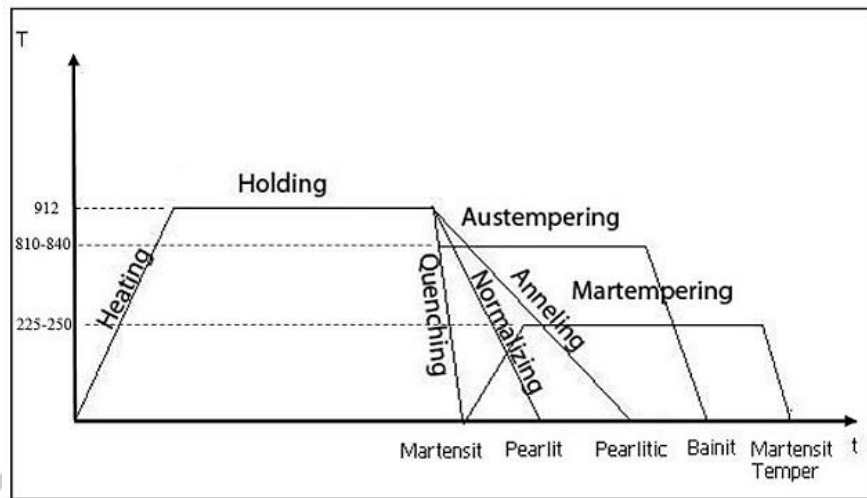
2.1.4. Tahapan Pekerjaan Sebelum Proses *Quenching*

Benda kerja yang ingin dikeraskan harus dibersihkan terlebih dahulu dari kerak, oli atau kotoran lain sebagainya, hal ini dilakukan agar kekerasan yang kita inginkan dapat dicapai dengan maksimal. Jika perlu benda kerja atau material yang mempunyai lubang harus ditutup dengan baja insert, tanah liat dan asbes untuk menghindari pengerasan yang terjadi pada lubang tersebut. Apabila lubang terlalu besar maka hal ini tidak perlu dilakukan.

Material baja AISI 1045 termasuk golongan baja karbon menengah sehingga dapat dipanaskan langsung sampai ke temperatur pemanasannya tanpa memerlukan pemanasan awal (*pre-heat*) dimana terjadi pada suhu 500 - 600° C.

Perlu untuk diketahui bahwa benda kerja yang ingin dikeraskan harus memiliki struktur yang homogen dan halus. Apabila benda kerja yang ingin dikeraskan memiliki struktur yang kasar maka akan diperoleh kekerasan yang tidak homogen, distorsi dan retak pada saat dipanaskan maupun pada saat diquench. (H.Anrinal 2013).

2.1.5. Jenis Pendinginan Lainnya



Gambar 2.1 Skema Heat Treatment

a. Annealing

Annealing merupakan proses perlakuan thermal pada material dengan memanaskannya sampai pada temperatur austenit kemudian di holding, lalu dilakukan pendinginan lambat di dalam tungku. Tujuannya untuk mendapatkan sifat mekanik yang ulet dan menghilangkan tegangan sisa. Fasa akhir pearlite kasar.

b. Normalizing

Normalizing merupakan proses perlakuan termal pada material dengan memanaskannya sampai temperatur austenit kemudian di holding, dan dilakukan pendinginan di udara terbuka pada temperatur kamar. Tujuannya untuk mengembalikan ukuran butir. Fasa akhir pearlite halus.

c. Tempering

Tempering adalah proses perlakuan panas untuk menghilangkan kegetasan material dengan cara pemanasan kembali. Material yang telah di

quenching kemudian dipanaskan lagi hingga temperatur eutectoid, lalu di holding dan dilakukan pendinginan lambat.

2.2. *Holding Time*

Holding time atau waktu penahanan dilakukan untuk mendapatkan kekerasan maksimum dari suatu bahan pada proses perlakuan panas dengan menahan pada temperatur pengerasan untuk memperoleh pemanasan yang homogen sehingga struktur austenitnya *homogen* atau terjadi kelarutan karbida ke dalam austenit dan terjadi difusi karbon dengan unsur paduan. (Suharno, S.T., M.T. & Budi Harjanto, S.T. & Prodi., 2015).

Waktu penahanan sangat berpengaruh pada saat transformasi karena apabila waktu penahanan yang diberikan kurang tepat atau terlalu cepat, maka transformasi yang terjadi tidak sempurna dan tidak homogen selain itu waktu tahan terlalu pendek akan menghasilkan kekerasan yang rendah hal ini dikarenakan tidak cukupnya jumlah karbida yang larut dalam larutan. Sedangkan apabila waktu penahanan yang diberikan terlalu lama, transformasi terjadi namun diikuti dengan pertumbuhan butir yang dapat menurunkan ketangguhan [Thelning, 1984 dalam (Pramono, 2011)]. Pedoman untuk menentukan waktu penahanan dari berbagai jenis baja dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Jenis baja dan waktu tahan yang dibutuhkan pada proses perlakuan panas [Prayitno.et.al, 1999 dalam (Pramono, 2011)].

Jenis Baja	Waktu tahan (menit)
Baja Karbon dan baja paduan rendah	5-15
Baja paduan menengah	15-25
<i>Low alloy tool steel</i>	10-30
<i>High alloy chrome steel</i>	10-60
<i>Hot-work tool steel</i>	15-30

Ketebalan benda uji sangat mempengaruhi pemberian waktu penahanan pada saat proses austenisasi. Secara matematis pemberian waktu penahanan terhadap ketebalan benda uji dapat ditulis pada persamaan 2.1 berikut [Krauss, 1986 *dalam* (Pramono, 2011)]

$$T = 1,4 \times H \quad (2.1)$$

Keterangan:

T : waktu penahanan (menit)

H : tebal benda kerja (mm)

2.3. Baja AISI 1045

Baja AISI 1045 adalah jenis material yang banyak digunakan dalam dunia industri otomotif. Baja AISI 1045 digolongkan dalam jenis material baja karbon sedang, dimana biasanya jenis material banyak digunakan untuk membuat berbagai macam komponen dan sparepart mesin yang berkekuatan sedang seperti poros roda, gear, rantai, kruk as, dan masih banyak yang lainnya. Dimana komponen mesin seperti poros roda, gear, dan rantai adalah komponen mesin yang jarang mendapat pelapisan atau juga pelumasan sehingga rawan terjadi korosi. Baja AISI 1045 memiliki kandungan karbon antara 0,43% - 0,50%. Mampu mesin dari baja AISI 1045 ini sangat baik, sehingga dapat dimesin oleh berbagai jenis mesin perkakas. Akan tetapi untuk mendapatkan sifat material yang diinginkan maka perlu dilakukan perlakuan panas (*heat treatment*). (Nugroho and Handono 2019).

2.3.1. Struktur Baja AISI 1045

AISI 1045 adalah baja karbon yang mempunyai kandungan karbon sekitar 0,43 - 0,50 dan termasuk golongan baja karbon menengah. Baja dengan kadar

karbon medium mempunyai sifat mampu tempa, *cold drawing*, *machining*, *heat treating* (termasuk *flame hardening*) serta mempunyai sifat ketahanan terhadap aus yang baik dengan melalui perlakuan *flame* atau *induction hardening*. Baja ini merupakan salah satu bahan untuk pembuatan kapak, baut, poros, *machinery parts*, *lightly stressed gears*, *pinions forming dies*, *hydraulic shafting*, *pump shafts*, *piston rods* dan lain-lain. Nilai persentase komposisi kimia yang terkandung pada baja AISI 1045 menurut standar ASTM A 827 - 85 bisa dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Komposisi Kimia Baja AISI 1045
Sumber : ASTM A 827 - 85

Sae/Aisi Max	Element, %				
	Carbon Max	Manganese	Phosphorus,	Sulfur,	Silicon
1009	0,15 max	0,60	0,035	0,040	0,15-0,40
1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,035	0,040	0,15-0,40
1035	0,32-0,38	0,60-0,90	0,035	0,040	0,15-0,40
1040	0,37-0,44	0,60-0,90	0,035	0,040	0,15-0,40
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,035	0,040	0,15-0,40
1050	0,48-0,55	0,60-0,90	0,035	0,040	0,15-0,40

Material baja AISI 1045 memiliki sifat mekanik sebagai berikut :

Tabel 2.3 Sifat-Sifat Mekanik Baja AISI 1045
Sumber : (Azom, 2012)

Kekuatan Tarik, σ_u	565 MPa 0.565 kN/mm ²
Kekuatan Luluh, σ_y	310 MPa 0.310 kN/mm ²
Perpanjangan (Elongation)	16 %

Baja AISI 1045 disebut sebagai baja karbon karena sesuai dengan pengkodean internasional, yaitu seri 10xx berdasarkan nomenklatur yang dikeluarkan oleh AISI dan SAE (*Society of Automotive Engineers*). Pada angka 10 pertama merupakan kode yang menunjukkan plain carbon kemudian kode xxx

setelah angka 10 menunjukkan komposisi karbon. Jadi baja AISI 1045 berarti baja karbon atau plain carbon steel yang mempunyai komposisi karbon sebesar 0,43%. Baja spesifikasi ini banyak digunakan sebagai komponen roda gigi, poros dan bantalan.

2.4. Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik atau kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) adalah nilai yang paling sering dituliskan sebagai hasil suatu uji tarik, tetapi pada kenyataannya nilai tersebut kurang bersifat mendasar dalam kaitannya dengan kekuatan material. Untuk logam ulet, kekuatan tariknya harus dikaitkan dengan beban maksimum, dimana logam dapat menahan beban sesumbu untuk keadaan yang sangat terbatas. Pada tegangan yang lebih kompleks, kaitan nilai tersebut dengan kekuatan logam kecil sekali kegunaannya. Kecenderungan yang banyak ditemui adalah, mendasarkan rancangan statis logam ulet pada kekuatan luluhnya. Tetapi karena jauh lebih praktis menggunakan kekuatan tarik untuk menentukan kekuatan bahan, maka metode ini lebih banyak dipakai. Kekuatan tarik adalah besarnya beban maksimum dibagi dengan luas penampang lintang awal benda uji. (Salindeho et al., 2018).

Untuk dapat mengetahui sifat mekanik dari suatu material maka diperlukan suatu pengujian, salah satu pengujian yang paling sering dilakukan yaitu uji tarik (tensile test). Pengujian ini memiliki fungsi untuk mengetahui tingkat kekuatan suatu material dan untuk mengenali karakteristik pada material tersebut.

2.4.1. Uji Tarik (*tensile test*)

Uji Tarik (*tensile Test*) adalah suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan (*tensile strength*) suatu material/bahan dengan cara memberikan beban (gaya statis) yang sesumbu dan diberikan secara lambat atau cepat. Diperoleh hasil sifat mekanik dari pengujian ini berupa kekuatan dan elastisitas dari material/bahan.

Pengujian tarik merupakan salah satu pengujian material yang paling banyak dilakukan di dunia industri. Karena pengujian ini terbilang yang paling mudah dan banyak data yang bias diambil dari pengujian ini. Diantaranya yang bisa didapat dari pengujian tarik ini adalah Kekuatan tarik (*Ultimate Tensile Strenght*), Kekuatan mulur (*Yield Strenght or Yield Point*), Elongasi (*Elongation*), Elastisitas (*Elasticity*) dan Pengurangan luas penampang (*Reduction of Area*). (Budiman, 2016). Pada pengujian tarik nantinya akan diperoleh sifat mekanik dari logam atau material lain yg diuji tersebut. Beberapa sifat mekanik dibagi menjadi 2, yaitu :

1. Sifat Mekanik di daerah Elastis

Adapun sifat –sifat mekanik yang berada didaerah elastis, diantaranya :

- a. Kekuatan elastis

Kemampuan batang untuk menerima beban / tegangan tanpa berakibat terjadinya *deformasi plastis* (perubahan bentuk yang permanen). Ditunjukkan oleh titik luluh (*yield*).

- b. Kekakuan (*stiffness*)

Suatu batang yang memiliki kekakuan tinggi bila mendapat beban (dalam batas elastisnya) akan mengalami *deformasi plastis*, tetapi hanya sedikit.

c. Modulus Resilience (*Modulus kelentingan*)

Kemampuan bahan untuk menyerap energi tanpa menyebabkan terjadinya *deformasi plastis*. Dinyatakan dengan besarnya luasan di bawah grafik daerah elastik (*Modulus Resilien*)

d. Modulus Young (*Modulus elastisitas*)

Didefinisikan sebagai ukuran kekakuan suatu material, semakin kecil regangan elastis yang terjadi, maka semakin kaku material itu.

2. Sifat mekanik di daerah plastis

Adapun sifat – sifat mekanik yang berada di daerah plastis, diantaranya :

a. Kekuatan tarik (*Tensile strength*)

Kemampuan batang untuk menerima beban/ tegangan tanpa mengakibatkan batang rusak atau putus. Kekuatan tarik maksimum ditunjukkan sebagai tegangan maksimum (*ultimate stress*) pada kurva tegangan-regangan.

b. Keuletan (*Ductility*)

Kemampuan bahan untuk berdeformasi tanpa menjadi patah. Dapat diukur dengan besarnya tegangan plastis yang terjadi setelah batang uji putus. Ditunjukkan sebagai garis elastik pada grafik tegangan-regangan.

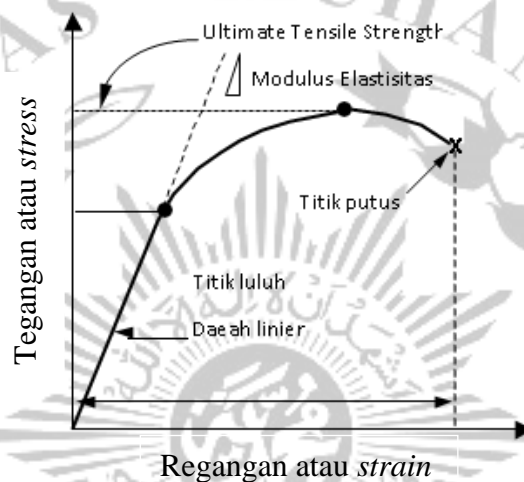
c. Ketangguhan (*Toughness*)

Kemampuan menyerap energi tanpa mengakibatkan patah, dapat diukur dengan besarnya energi yang diperlukan untuk mematahkan batang uji. Ketangguhan dinyatakan dengan modulus ketangguhan yaitu banyaknya energi yang dibutuhkan untuk mematahkan satu satuan volume bahan. Ditunjukkan sebagai keseluruhan luasan di bawah kurva tegangan-

regangan,

2.4.2. Tegangan – Regangan (*Stress – Strain*)

Kurva ini menunjukkan hubungan antara tegangan dan regangan (*stress vs strain*). Profil ini sangat diperlukan dalam desain yang memakai bahan tersebut. Kurva yang menyatakan hubungan antara strain dan stress seperti ini kerap disingkat kurva SS (SS curve).



Gambar 2.2 Kurva Tegangan – Regangan

Selanjutnya kita dapatkan Gambar 2.2, yang merupakan kurva standar ketika melakukan eksperimen uji tarik. E adalah gradien kurva dalam daerah linier, di mana perbandingan tegangan (σ) dan regangan (ϵ) selalu tetap. E diberi nama "*Modulus Elastisitas*" atau "*Young Modulus*".

Biasanya yang menjadi fokus perhatian adalah kemampuan maksimum bahan tersebut dalam menahan beban. Kemampuan ini umumnya disebut "*Ultimate Tensile Strength*" disingkat dengan **UTS**, dalam bahasa Indonesia disebut tegangan tarik maksimum.

Hukum Hooke (Hooke's Law)

Untuk hampir semua logam, pada tahap sangat awal dari uji tarik, hubungan antara beban atau gaya yang diberikan berbanding lurus dengan perubahan panjang bahan tersebut. Ini disebut daerah linier atau linear zone. Di daerah ini, kurva pertambahan panjang vs beban mengikuti aturan Hooke sebagai berikut:

rasio tegangan (stress) dan regangan (strain) adalah konstan

Stress adalah beban dibagi luas penampang bahan dan strain adalah pertambahan panjang dibagi panjang awal bahan.

Stress: $\sigma = F/A$ F: gaya tarikan, A: luas penampang

Strain: $\varepsilon = \Delta L/L$ ΔL : pertambahan panjang, L: panjang awal

Hubungan antara stress dan strain dirumuskan:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

Keterangan :

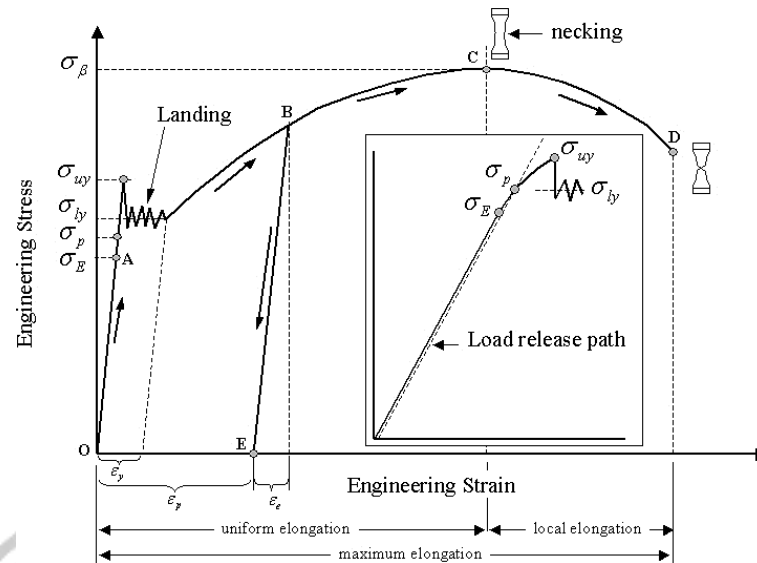
E = Modulus elastisitas bahan (N/mm^2)

σ = Tegangan tarik

ε = Regangan aksial

2.4.3. Detail profil uji tarik dan sifat mekanik logam

Sekarang akan kita bahas profil data dari tensile test secara lebih detail. Untuk keperluan kebanyakan analisa teknik, data yang didapatkan dari uji tarik dapat digeneralisasi seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Profil data hasil uji Tarik

Kita akan membahas istilah mengenai sifat-sifat mekanik bahan dengan berpedoman pada hasil uji tarik seperti pada Gambar 2.3. Asumsikan bahwa kita melakukan uji tarik mulai dari titik O sampai D sesuai dengan arah panah dalam gambar.

a. Batas elastis σ_E (elastic limit)

Dalam Gambar 2.3 dinyatakan dengan titik A. Bila sebuah bahan diberi beban sampai pada titik A, kemudian bebannya dihilangkan, maka bahan tersebut akan kembali ke kondisi semula (tepatnya hampir kembali ke kondisi semula) yaitu regangan “nol” pada titik O (lihat inset dalam Gbr 2.3). Tetapi bila beban ditarik sampai melewati titik A, hukum Hooke tidak lagi berlaku dan terdapat perubahan permanen dari bahan. Terdapat konvensi batas regangan permanen (permanent strain) sehingga masih disebut perubahan elastis yaitu kurang dari 0.03%, tetapi sebagian referensi menyebutkan 0.005% . Tidak ada standarisasi yang universal mengenai nilai ini.

b. Batas proporsional σ_p (*proportional limit*)

Titik sampai di mana penerapan hukum Hook masih bisa ditolerir. Tidak ada standarisasi tentang nilai ini. Dalam praktek, biasanya batas proporsional sama dengan batas elastis.

c. Deformasi plastis (*plastic deformation*)

Yaitu perubahan bentuk yang tidak kembali ke keadaan semula. Pada Gbr 2.3 yaitu bila bahan ditarik sampai melewati batas proporsional dan mencapai daerah landing.

d. Tegangan luluh atas σ_{uy} (*upper yield stress*)

Tegangan maksimum sebelum bahan memasuki fase daerah landing peralihan deformasi elastis ke plastis.

e. Tegangan luluh bawah σ_{ly} (*lower yield stress*)

Tegangan rata-rata daerah landing sebelum benar-benar memasuki fase deformasi plastis. Bila hanya disebutkan tegangan luluh (*yield stress*), maka yang dimaksud adalah tegangan ini.

f. Regangan luluh ϵ_y (*yield strain*)

Regangan permanen saat bahan akan memasuki fase deformasi plastis.

g. Regangan elastis ϵ_e (*elastic strain*)

Regangan yang diakibatkan perubahan elastis bahan. Pada saat beban dilepaskan regangan ini akan kembali ke posisi semula.

h. Regangan plastis ϵ_p (*plastic strain*)

Regangan yang diakibatkan perubahan plastis. Pada saat beban dilepaskan regangan ini tetap tinggal sebagai perubahan permanen bahan.

i. **Regangan total** (*total strain*)

Merupakan gabungan regangan plastis dan regangan elastis, $\epsilon_T = \epsilon_e + \epsilon_p$.

Perhatikan beban dengan arah OABE. Pada titik B, regangan yang ada adalah regangan total. Ketika beban dilepaskan, posisi regangan ada pada titik E dan besar regangan yang tinggal (OE) adalah regangan plastis.

j. **Tegangan tarik maksimum TTM** (*UTS, ultimate tensile strength*)

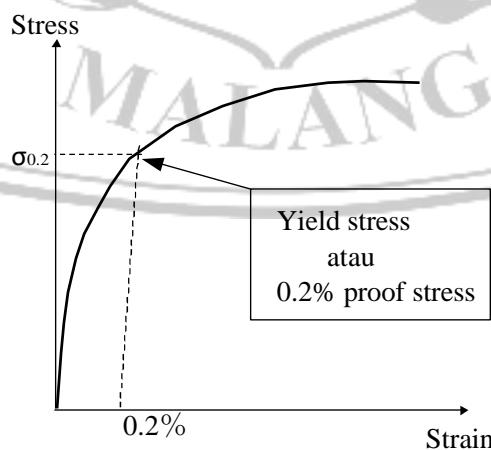
Pada Gambar 2.3 ditunjukkan dengan titik C (σ_B), merupakan besar tegangan maksimum yang didapatkan dalam uji tarik.

k. **Kekuatan patah** (*breaking strength*)

Pada Gambar 2.3 ditunjukkan dengan titik D, merupakan besar tegangan di mana bahan yang diuji putus atau patah.

l. **Tegangan luluh pada data tanpa batas jelas antara perubahan elastis dan plastis**

Untuk hasil uji tarik yang tidak memiliki daerah linier dan landing yang jelas, tegangan luluh biasanya didefinisikan sebagai tegangan yang menghasilkan regangan permanen sebesar 0.2%, regangan ini disebut offset-strain (Gbr 2.4).



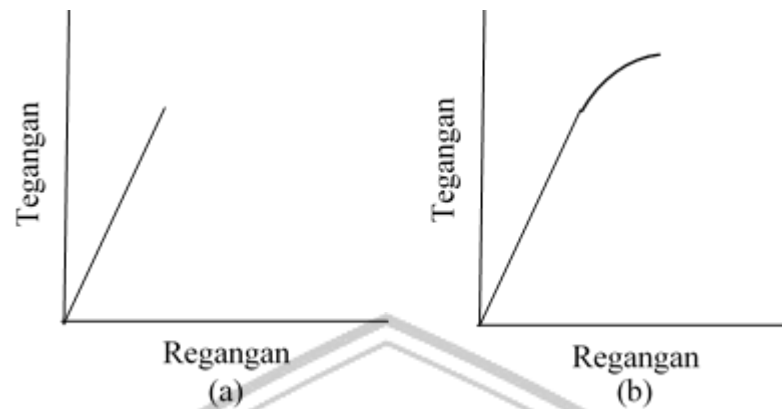
Gambar 2.4 Penentuan tegangan luluh (*yield stress*) untuk kurva tanpa daerah linier

Perlu untuk diingat bahwa satuan SI untuk tegangan (*stress*) adalah Pa (Pascal, N/m^2) dan strain adalah besaran tanpa satuan.

2.4.4. Perilaku Ulet dan Perilaku Getas

Perilaku umum bahan yang dibebani dapat diklasifikasikan sebagai ulet atau getas, tergantung apakah bahan itu memperlihatkan kemampuan untuk mengalami deformasi plastik atau tidak. Bahan yang getas adanya deformasi akan patah hampir pada batas elastis (Gambar 2.5) sedang logam getas seperti misalnya besi cor putih, memperlihatkan plastik dalam jumlah kecil sebelum patah (gambar 2.5-b). Keuletan yang memadai merupakan suatu pertimbangan rekayasa yang penting, sebab keuletan memberikan kesempatan kepada bahan untuk distribusi ulang tegangan setempat. Bilamana tegangan di sekitar takik dan pada konsentrasi tegangan lain kebetulan tidak perlu diperhatikan, ada kemungkinan membuat disain untuk situasi statis atas dasar tegangan rata-rata. Tetapi dengan bahan yang getas, tegangan yang dialokasikan terus menerus bertambah besar, apabila tidak terjadi luluh lokal (*local yielding*). Akhirnya terbentuklah retak pada satu atau lebih konsentrasi tegangan yang menjalar dengan cepat. Bahkan apabila tidak terdapat konsentrasi tegangan dalam logam getas, perpatahan akan tetap terjadi dengan tiba-tiba, sebab tegangan luluh praktis identik dengan kekuatan tarik.

Penting untuk dicatat, bahwa kegetasan bukan merupakan sifat mutlak logam. Logam seperti misalnya Tungsten yang getas pada temperatur kamar dan ulet pada temperatur tinggi. (Syawaidi, 2006)



**Gambar 2.5 (a) garis lengkung Teg-Reg untuk bahan yang getas sempurna (Perilaku Ideal),
(b) Garis Lengkung Teg-Reg untuk logam getas dengan sedikit Keuletan**

2.4.5. Mulur (*Creep*)

Mulur (*creep*) didefinisikan sebagai regangan (*strain*) yang bergantung waktu (*time*). Mulur terjadi sebagai akibat adanya deformasi lambat dari suatu material/logam/komponen yang bekerja dengan kondisi beban (*load*) dan atau suhu tinggi yang konstan. Mulur dapat terjadi pada berbagai suhu, namun mulur ideal terjadi pada suhu antara 0,4 sampai 0,6 dari titik lebur materialnya. Dengan kata lain bila suatu komponen beroperasi dengan beban dan atau suhu tinggi yang konstan, maka komponen tersebut akan mengalami mulur. Ini disebabkan komponen tersebut secara bertahap mengalami deformasi plastis. Apabila batas regangan maksimum terlampaui, komponen akan patah/putus. (Nitiswati dkk, 1999).

2.4.6. Kelelahan (*Fatigue*)

Fatigue atau kelelahan adalah bentuk dari kegagalan yang terjadi pada struktur karena beban dinamik yang berfluktuasi dibawah yield strength yang terjadi dalam waktu yang lama dan berulang-ulang. Fatik menduduki 90% penyebab utama kegagalan pemakaian. Terdapat 3 fase dalam perpatahan fatik :

permulaan retak, penyebaran retak, dan patah. Mekanisme dari permulaan retak umumnya dimulai dari crack initiation yang terjadi di permukaan material yang lemah atau daerah dimana terjadi konsentrasi tegangan di permukaan (seperti goresan, notch, lubang-pits dll) akibat adanya pembebanan berulang. Selanjutnya, adalah penyebaran retak ini berkembang menjadi microcracks. Kebanyakan kegagalan pemakaian terjadi sebagai akibat dari tegangan tarik.

Awal proses terjadinya kelelahan (*fatigue*) adalah jika suatu benda menerima beban yang berulang maka akan terjadi slip. Ketika slip terjadi dan benda berada di permukaan bebas maka sebagai salah satu langkah yang disebabkan oleh perpindahan logam sepanjang bidang slip. Ketika tegangan berbalik, slip yang terjadi dapat menjadi negatif (berlawanan) dari slip awal, secara sempurna dapat mengesampingkan setiap efek deformasi. Deformasi ini ditekan oleh pembebanan yang berulang, sampai suatu retak yang dapat terlihat akhirnya muncul retak mula-mula terbentuk sepanjang bidang slip.

Faktor-faktor yang mempengaruhi fatigue adalah :

1. Tegangan Siklik
Besarnya tegangan siklik tergantung pada kompleksitas geometri dan pembebanan.
2. Geometri
Konsentrasi stress akibat variasi bentuk geometri merupakan titik dimulainya fatigue cracks.
3. Kualitas permukaan
Kekasaran permukaan dapat menyebabkan konsentrasi stress mikroskopis yang menurunkan ketahanan fatik

4. Tipe material

Fatigue setiap material berbeda beda, contohnya komposit dan polymer memiliki fatigue yang berbeda dengan metal.

5. Tegangan sisa

Proses manufaktur seperti pengelasan, pemotongan, casting dan proses lainnya yang melibatkan panas atau deformasi dapat membentuk tegangan sisa yang dapat menurunkan ketahanan fatik material.

6. Besar dan penyebaran internal defects

Cacat yang timbul akibat proses casting seperti gas porosity, non-metallic inclusions dan shrinkage voids dapat menurunkan ketahanan fatik.

7. Arah beban

Untuk non-isotropic material, ketahanan fatik dipengaruhi oleh arah tegangan utama.

8. Besar butir

Pada umumnya semakin kecil ukuran butir akan memperpanjang fatigue.

9. Lingkungan

Kondisi lingkungan yang dapat menyebabkan erosi, korosi dapat mempengaruhi fatigue life.

10. Temperatur

Temperatur tinggi menurunkan ketahanan fatik material.

Fatigue life dapat ditingkatkan dengan cara :

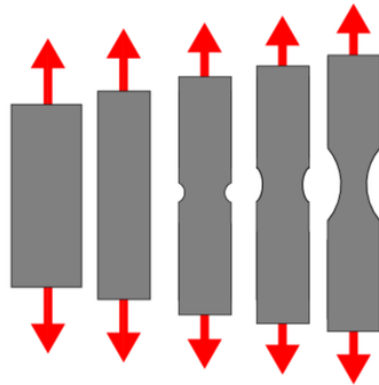
1. Mengontrol tegangan

— Peningkatan tegangan menurunkan umur fatik.

- Pemicunya dapat secara mekanis (fillet atau alur pasak) maupun metalurgi (porositas atau inklusi).
- Kegagalan fatik selalu dimulai pada peningkatan tegangan
- 2. Mengontrol struktur mikro
 - Meningkatnya ukuran benda uji, umur fatik kadang - kadang menurun
 - Kegagalan fatik biasanya dimulai pada permukaan
 - Penambahan luas permukaan dari benda uji besar meningkatkan kemungkinan dimana terdapat suatu aliran, yang akan memulai kegagalan dan menurunkan waktu untuk memulai retak
- 3. Mengontrol penyelesaian permukaan
 - Dalam banyak pengujian dan aplikasi pemakaian, tegangan maksimum terjadi pada permukaan
 - Umur fatik sensitif terhadap kondisi permukaan
 - Faktor lain yang harus dipertimbangkan adalah tegangan sisa permukaan.

2.4.7. Necking

Necking atau distribusi tegangan pada daerah penyempitan setempat pada uji tarik menimbulkan keadaan tegang tiga sumbu pada daerah penyempitan. Daerah penyempitan setempat sebenarnya merupakan fatigue halus. Fatig yang dikenai beban tarik akan menghasilkan tegangan linear yang diperlukan dengan cara membagi beban tarik aksial dengan luas penampang lintas benda uji pada daerah penyempitan terkecil, lebih tinggi, dari pada yang dibutuhkan untuk menghasilkan aliran jika tegangan tariknya sederhana. Pada umumnya necking terjadi ditengahh atau titik berat spesimen. Hal ini disebabkan karena distribusi tegangan yang tidak merata pada spesimen.

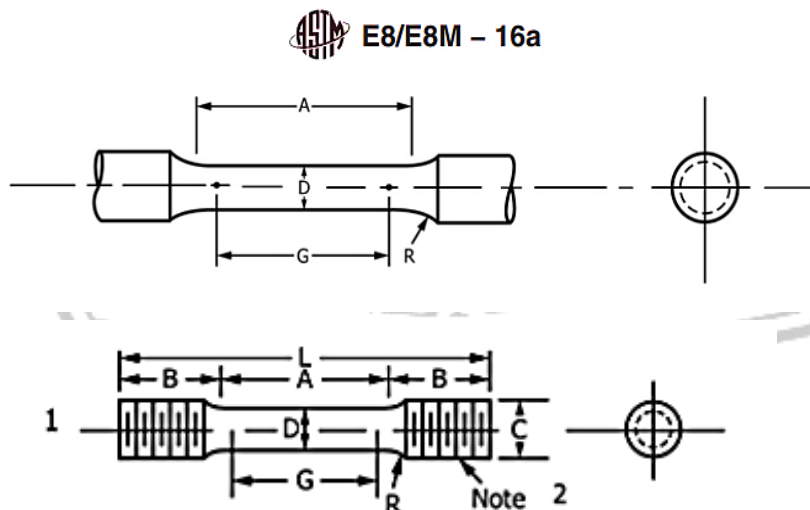


Gambar 2.6 Skema diagram necking

2.4.8. Spesimen Uji Tarik

Dalam ASTM E8 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) telah diatur mengenai bentuk spesimen uji tarik yang baku. Dalam standar tersebut, sebuah spesimen uji tarik harus memiliki spesifikasi tertentu meliputi Gauge Length (G), Diameter (D), Radius (R), Over all length (L), Length of Reduced (A), Length of End Section (B), dan Diameter of End Section (C).

Jika batang uji berupa round bar maka ditunjukkan bentuk spesimen uji round bar sesuai dengan ASTM E8/E8 – 16a Pada gambar 2.7 berikut ini.



Gambar 2.7 Spesimen Uji Tarik Bentuk Round Bar Berdasarkan ASTM E8

Sumber : E8/E8M – 16a

Dalam ASTM E8 juga diatur dimensi standar dari spesimen uji tarik berbentuk Round Bar, maka ditentukan Gauge Length – G nya berdasarkan ASTM E8/E8M – 16a (Standard for Test Specimen 1) adalah 50.1 mm (2 in.). Disertai pembentukan Diameter – D spesimen uji sebesar 12.7 mm (0.51 in.) , Radius of Fillet – R sebesar 10 mm (0.37 in.) dan Length of reduced section – A sebesar 56 mm (2.25 in.) Seperti pada Tabel berikut ini yang terlihat pada Tabel 2.4 di bawah ini.

Tabel 2.4 : Dimensi Spesimen Uji Tarik Berdasarkan ASTM E8

Sumber : ASTM E8/E8M – 16a

Dimensions, mm [in.]					
For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]					
Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard				
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced parallel section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Dimensions, mm [in.]					
For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]					
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gauge length	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	10 [0.375]	2 [0.0625]	10 [0.375]	10 [0.375]
A—Length of reduced parallel section	56 [2.25] min	56 [2.25] min	100 [4] approximate	56 [2.25] min	56 [2.25] min
L—Overall length, approximate	145 [5]	155 [5.5]	155 [5.5]	140 [4.75]	255 [9.5]
B—Length of end section (Note 3)	35 [1.375] approximate	25 [1] approximate	20 [0.75] approximate	15 [0.5] approximate	75 [3] min
C—Diameter of end section	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]	22 [0.875]	20 [0.75]
E—Length of shoulder and fillet section, approximate		15 [0.625]		20 [0.75]	15 [0.625]
F—Diameter of shoulder		15 [0.625]		15 [0.625]	15 [0.625]

2.5. Uji Mikrostruktur

Struktur mikro pada material sangat erat kaitannya dengan sifat pada logam tersebut. Pengubahan struktur mikro pada logam khususnya bisa melalui pengaturan laju pendinginan yang akan mengubah sifat baja dikenal dengan istilah *Heat Treatment*.

Struktur mikro adalah struktur terkecil yang terdapat dalam suatu bahan yang keberadaannya tidak dapat di lihat dengan mata telanjang, tetapi harus

menggunakan alat pengamat struktur mikro diantaranya; mikroskop cahaya, *mikroskop electron*, *mikroskop field ion*, *mikroskop field emission* dan mikroskop sinar-X. Penelitian ini menggunakan mikroskop cahaya, adapun manfaat dari pengamatan struktur mikro ini adalah:

1. Mempelajari hubungan antara sifat-sifat bahan dengan struktur dan cacat pada bahan.
2. Memperkirakan sifat bahan jika hubungan tersebut sudah diketahui. (Tarkono et al., 2013)

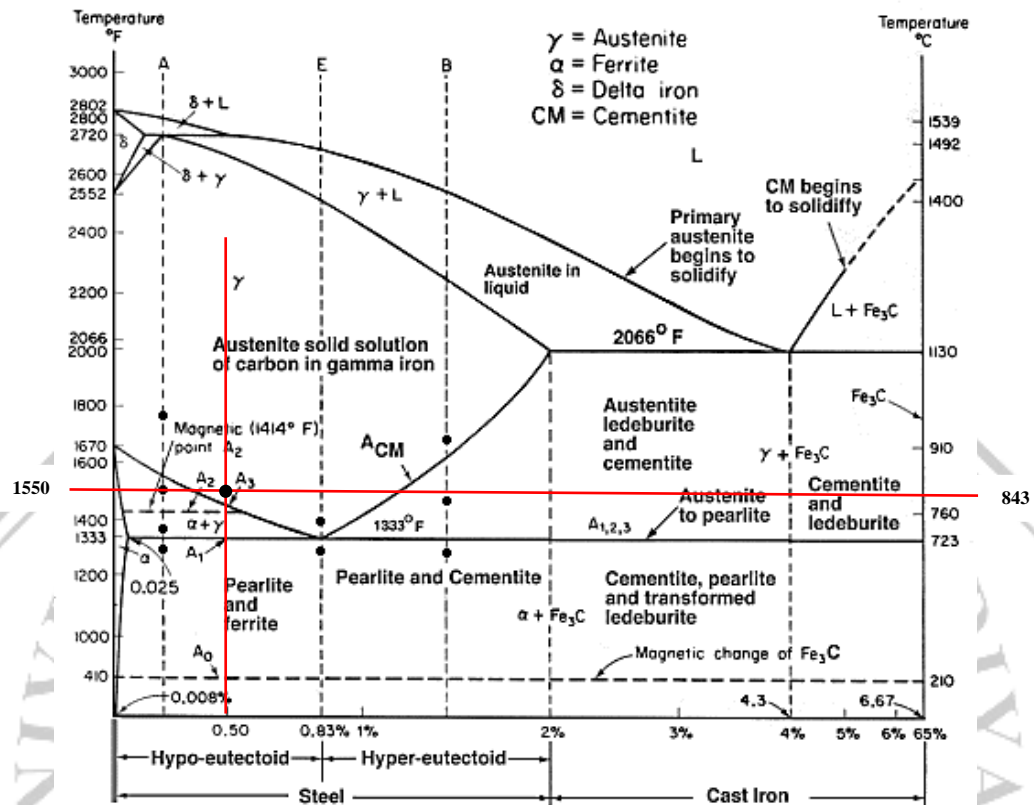
Besi dan baja memiliki sifat yang bervariasi, dari yang paling lunak dan mudah dibentuk sampai yang paling keras. Karena itu kedua bahan ini paling banyak digunakan sebagai bahan industri. Struktur mikro logam dapat dianalisa sehubungan dengan sifat logam dan paduannya dengan meneliti susunan terkecil pada logam yang terdiri dari ferrite dan pearlite setelah dikenakan perlakuan panas.

Penelitian ini sangat bermanfaat bagi perkembangan pengetahuan mengenai struktur/susunan suatu logam, tingkat kekerasan yang dimiliki dan proses yang tepat dalam meningkatkan ketangguhan logam, sehingga diperoleh suatu acuan atau pegangan yang jelas dalam memilih dan menentukan logam yang tepat dalam suatu pengerjaan. (Yani et al., 2008)

2.6. Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Diagram fasa adalah diagram yang menampilkan hubungan antara temperatur dengan kadar karbon, dimana terjadi perubahan fasa selama proses pendinginan dan pemanasan. Diagram fasa Fe-C merupakan diagram yang menjadi parameter untuk mengetahui segala jenis fasa yang terjadi didalam baja,

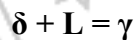
serta untuk mengetahui faktor-faktor apa saja yang terjadi di dalam baja paduan dengan berbagai jenis perlakuan.



Gambar 2.8 Diagram Fasa Baja Karbon [Fe-Fe₃C].
Garis merah menggambarkan baja AISI 1045.

Keterangan gambar:

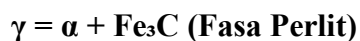
- a. Reaksi peritektik terjadi pada temperatur 1493°C dengan 0,5% C.



- b. Reaksi eutektik terjadi pada temperatur 1147°C dengan 4,3% C.



- c. Reaksi eutektoid terjadi pada temperatur 727°C dengan 0,76% C.



- d. Diagram ini menggambarkan dua jenis logam ferro, yaitu:

- 0 – 2,1% C, adalah baja karbon. Dan dibagi menjadi;

- a) Baja hipoeutektoid apabila %C < 0,76% C.

b) Baja hipereutektoid apabila $0,76\% \text{ C} < \% \text{C} < 2,1\% \text{ C}$.

- $2,1\% - 4,3\% \text{ C}$ adalah besi cor

a) Besi cor hipoeutektik apabila $2,1\% \text{ C} < \% \text{C} < 4,3\% \text{ C}$.

b) Besi cor hipereutektik apabila $\% \text{C} > 4,3\% \text{ C}$.

e. Pada diagram fasa ini terdapat beberapa fasa, yaitu:

- *Delta ferrite* (δ), memiliki sel satuan BCC.
- *Austenite* (γ), memiliki sel satuan FCC.
- *Ferrite* (α), memiliki sel satuan BCC.

Dari sel satuan itu, maka baja tergolong kepada logam politropik atau allotropik.

f. Kelarutan C maksimum dalam Fe adalah $0,022\%$.

g. Jadi fasa-fasa hasil reaksi adalah:

- Fasa *Austenite* = γ
- Fasa *Pearlite*: $\gamma = \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$
- Fasa Ledeburid: $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ h. Fasa Perlit maksimum pada $0,76\% \text{ C}$.

Baja karbon pada diagram fasa Fe-Fe₃C akan mengalami perubahan fasa seiring meningkatnya temperatur pemanasan logam. Fasa yang akan terbentuk dipengaruhi oleh temperatur pemanasan dan kandungan karbon pada baja tersebut. Fasa yang akan terbentuk seperti pada diagram diantaranya adalah:

a. *Ferrite* atau $\alpha - \text{iron}$

Merupakan struktur besi pada temperature ruang, *ferrite* lunak dan mudah dibentuk, biasanya dikomersialkan dalam bentuk murni. Memiliki kekuatan tarik hingga 45000 psi dan pada temperature dibawah 767°C

bersifat ferromagnetic. *Ferrite* memiliki kelarutan yang rendah terhadap karbon. *Ferrite* memiliki sel satuan atom BCC (*Body Center Cubic*).

b. *Austenite* atau γ – *iron*

Merupakan fasa stabil besi pada temperature antara 910 – 1400°C. *Austenite* juga lunak dan mudah dibentuk sehingga sangat cocok untuk proses fabrikasi seperti fogging dan rolling. Memiliki kelarutan yang cukup baik pada karbon yaitu 2 % dan bersifat paramagnetic.

c. δ – *iron*

Merupakan fasa stabil besi pada suhu diatas 1400°C dan memiliki struktur kristal BCC (*Body Center Cubic*). Sifatnya hampir sama dengan *ferrite* dan sangat sedikit larut dalam karbon namun msih lebih baik dibandingkan dengan *ferrite*.

d. *Cementite* (Fe_3C)

Strukturnya ortorombik dan mengandung 6,67 % karbon. Jika dibandingkan dengan *austenite* dan *ferrite*, *cementite* sangat keras dan tetapi getas karena adanya Fe_3C dan *ferrite*.

e. Fe – C *Eutectoid*

Jika Fe – C *eutectoid* diturunkan temperaturnya maka akan terbentuk *ferrite* dan Fe_3C yang berasal dari *austenite* pada komposisi eutectoid. Mikrostruktur yang terbentuk berupa lamellar dan biasa disebut *Pearlite*, merupakan kondisi yang paling diinginkan pada pembuatan baja.

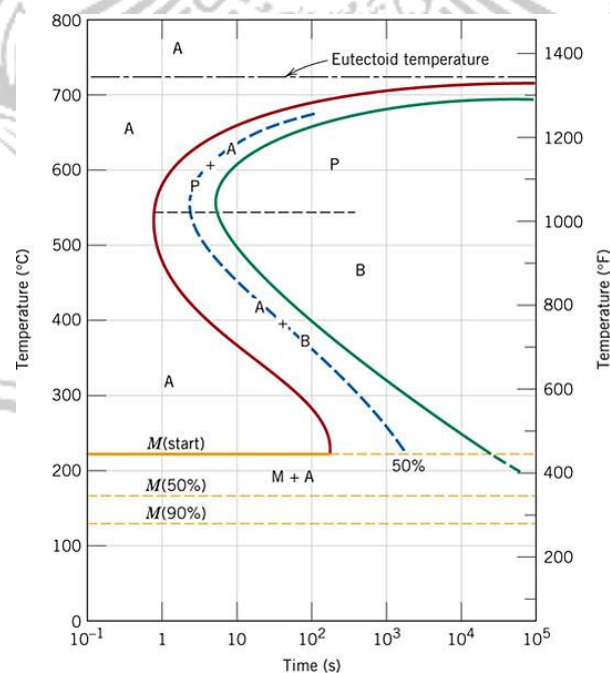
2.7. Diagram Transformasi Fasa

Transformasi fasa adalah sebuah topik dasar yang harus dikuasai untuk mempelajari perlakuan panas atau hardening. Transformasi fasa bisa terjadi dengan memvariasikan temperatur, komposisi dan tekanan. Perubahan temperatur terhadap fasa dapat dilihat menggunakan diagram fasa. Namun untuk mengetahui struktur mikro akibat laju pendinginan dapat diketahui melalui diagram transformasi fasa.

Diagram transformasi fasa terbagi dua berdasarkan jenis pendinginannya. Yaitu:

2.7.1. Isothermal Transformation Diagram (IT)

Diagram IT (*Isothermal Transformation*) atau TTT (*Time Temperatur Transformation*) adalah diagram pendinginan yang menggunakan dua tahapan pendinginan untuk menghasilkan struktur mikro. Diagram pendinginan berikut merupakan contoh pendinginan pada proses pendinginan menggunakan model IT untuk baja eutektoid.

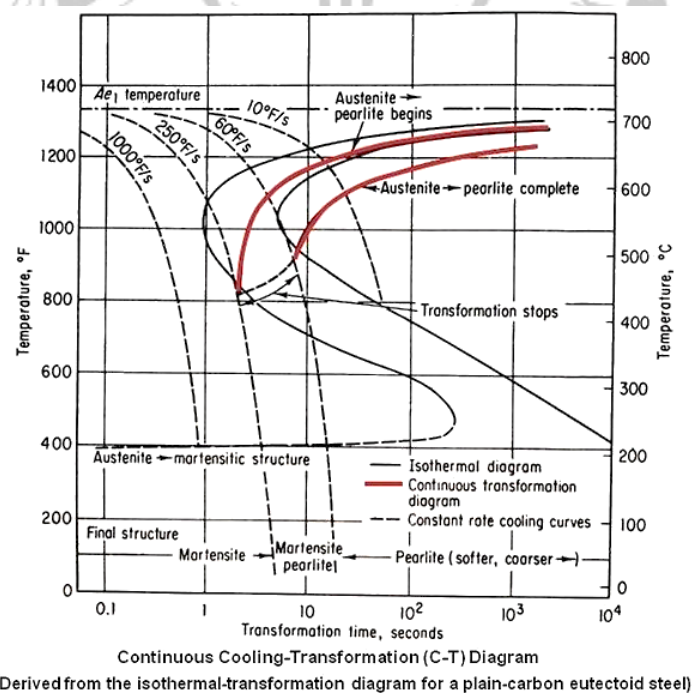


Gambar 2.9 Diagram Isothermal – Transformasi (*eutectoid*) steel

Dalam diagram pendinginan IT tersebut dapat dilihat fasa-fasa yang akan terbentuk pada temperatur pendinginan tertentu. A merupakan simbol untuk fasa Austenite, P untuk pearlite, dan B untuk bainite. Dalam diagram tersebut juga terdapat grafik hubungan antara temperature dan waktu pendinginan

2.7.2. Diagram CCT

Diagram Continuous Cooling Transformation, atau biasa disebut CCT Diagram, merupakan diagram yang menggambarkan hubungan antara laju pendinginan kontinyu dengan fasa atau mikrostruktur yang terbentuk, yang dapat dilihat dari diagram Continuous Cooling Transformation



Gambar 2.10 Diagram Continuous Cooling - Transformation (*eutectoid*) steel

Keterangan:

- Ketika pendinginan dilakukan sangat cepat, maka akan terbentuk *martensite*.

- b. Ketika waktu pendinginan ditambah, maka akan terbentuk *martensite* + *pearlite*.
- c. Ketika waktu pendinginan berlangsung lama, maka akan terbentuk *pearlite*.
- d. Adanya unsur paduan tambahan memungkinkan untuk menggeser posisi hidung *pearlite* dan hidung *bainite*, sehingga kemungkinan terbentuknya *martensite* semakin besar.

